

УДК 621.396.96

СТАТИСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЭХО-СИГНАЛОВ ЦЕЛЕЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ СНИЖЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ЗАМЕТНОСТИ

В.Ф. Зюкин, А.А. Грызо, П.А. Коваленко
(Харьковский университет Воздушных Сил)

Предлагается модельный ряд из шести моделей, достаточно полно охватывающий многообразие реальных аэродинамических целей. Известные модели дополнены двумя моделями целей выполненных по технологии снижения радиолокационной заметности.

статистические модели, эхо-сигналы, технология снижения радиолокационной заметности

Постановка задачи. При моделировании сигнально-помеховой обстановки в обзорных РЛС РТВ возникает задача выбора моделей эхо-сигналов, и которые с достаточной полнотой охватывают все многообразие входных воздействий. **Цель статьи** – получить конечный ряд моделей, включающий описание флуктуации эхо-сигналов целей, выполненных по технологии снижения радиолокационной заметности. Для всех моделей найти плотности распределения огибающей аддитивной смеси сигнала и шума.

Опишем пачку эхо-сигнала цели в виде вектор-столбца [1]

$$\dot{U}_c = \left\| b_1 \cdot \dot{x}_1 \cdot e^{j\beta_1}, b_2 \cdot \dot{x}_2 \cdot e^{j\beta_2}, \dots, b_N \cdot \dot{x}_N \cdot e^{j\beta_N} \right\|^T. \quad (1)$$

Комплексные отсчеты ожидаемого сигнала \dot{x}_i детерминированы. Комплексные числа $b_i \cdot e^{j\beta_i} = \dot{b}_i$ (случайные амплитудные множители b_i и случайные начальные фазы β_i) учитывают изменение структуры импульсов пачки за счет флуктуаций, приводящих к нежесткости структуры сигнала. Для их описания вводится вектор случайных параметров $B = \|b_1, b_2, \dots, b_i, \dots, b_N, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_i, \dots, \beta_N\|$.

Для статистического описания пачки эхо-сигналов (1) необходимо определение совместной плотности распределения компонент b_i, β_i :

$$P(B) = P(b_1, b_2, \dots, b_i, \dots, b_N, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_i, \dots, \beta_N). \quad (2)$$

1. Анализ последних достижений и публикаций. Множество вероятностных описаний эхо-сигналов, вытекающих из (2), сведем к ряду

практически важных ситуаций, представленных в табл. 1.

А. Пачка когерентных (дружно флюктуирующих) радиоимпульсов: $b_i = b$, $\beta_i = \beta$. Выражение (2) для независимых флюктуаций амплитуды b и равномерно распределенной в интервале $[0, 2\pi]$ начальной фазы β приводится к виду $P(B) = P(b) \cdot P(\beta) = P(b)/(2 \cdot \pi)$. В частном случае, при $P(b) = \delta(b-1)$ имеем пачку нефлюктуирующих по амплитуде радиоимпульсов со случайной равновероятной начальной фазой и неслучайной единичной амплитудой. Такой характер могут иметь отражения от объекта с одной блестящей точкой, например, шара (модель 1, табл. 1).

Б. Пачка дружно флюктуирующих по амплитуде некогерентных радиоимпульсов с независимыми флюктуациями начальных фаз β_i :

$$P(B) = P(b) \cdot \prod_i P(\beta_i), \quad P(\beta_i) = \frac{1}{2 \cdot \pi}, \quad 0 \leq \beta_i \leq 2 \cdot \pi. \quad (3)$$

При $P(b) = \delta(b-1)$ – нефлюктуирующие по амплитуде отражения (например, от шара) (модель 1, табл. 1) при некогерентном излучении РЛС.

В. Пачка независимо флюктуирующих радиоимпульсов:

$$P(B) = P(b, \beta) = \prod_i P(b_i) \cdot P(\beta_i), \quad P(b_i, \beta_i) = \frac{P(b_i)}{2 \cdot \pi}. \quad (4)$$

Г. Пачка радиоимпульсов с произвольной корреляцией между ними (совместная плотность распределения определяется выражением (2)). Важной характеристикой является матрица взаимных корреляционных функций комплексных амплитуд (отсчетов) $\dot{\Phi}_c = \frac{1}{2} \cdot \langle \dot{U}_c \cdot \dot{U}_c^{*T} \rangle$.

Элементы матрицы $\dot{\Phi}_{c,i,k} = \frac{1}{2} \cdot \langle \dot{u}_{c,i} \cdot \dot{u}_{c,k}^* \rangle = \frac{1}{2} \langle b_i \cdot b_k \cdot e^{j(\beta_i - \beta_k)} \rangle \cdot \dot{x}_i \cdot \dot{x}_k^*$ могут быть найдены при известной многомерной плотности распределения вероятности $P(B)$ (2).

В качестве плотностей вероятности $P(b)$ ($P(b_i)$), для ситуаций А, Б, В часто берут n -распределение Накагами.

$$P(b) = \frac{2 \cdot n^n}{\Gamma(n)} \cdot b^{2 \cdot n - 1} \cdot \exp(-n \cdot b^2), \quad (5)$$

где $\Gamma(n)$ – гамма-функция.

Частным случаем распределения амплитудного множителя b (5) при $n = 1$ является релеевское, что при равномерном распределении фазы β_i соответствует нормальному распределению квадратурных компонент такого сигнала.

Эта модель описывает распределение амплитуд сигналов, отраженных от целей с большим числом случайно расположенных, независимо

отражающих и равноценных по интенсивности (возможно, случайно перемещающихся, мерцающих) элементов (блестящих точек).

В качестве примера такого объекта для импульсных обзорных РЛС РТВ сантиметрового (дециметрового) диапазонов длин волн выбран бомбардировщик типа В-52 (модель 4, табл. 1).

Выберем, помимо модели 4, еще две, соответствующие параметру $n = 2$ (модель 3, табл. 1) и $n = 3$ (модель 2, табл. 1) Плотности вероятности распределения амплитуд эхо-сигнала на фоне шума и примеры соответствующих объектов для этих моделей приведены в табл. 1 (q^2 – отношение мощности сигнала к уровню шума $\sigma_{\text{ш}}^2$, причем $\sigma_{\text{ш}}^2 = 1$, U – безразмерная случайная величина)

2. Изложение основного материала. Вероятностное описание эхо-сигналов целей, выполненных по технологии снижения радиолокационной заметности. Показателем применимости (коэффициент $K_{\text{ц}}$) одномодальных законов распределения амплитуды сигналов является отношение среднего значения эффективной поверхности рассеяния $\langle \sigma_{\text{ц}} \rangle$ к медианному значению $\sigma_{\text{ц,мед}}$ $K_{\text{ц}} = \langle \sigma_{\text{ц}} \rangle / \sigma_{\text{ц,мед}}$. Для широкого класса целей, описываемых распределением (5) значения $K_{\text{ц}}$ близки к единице (табл. 1, модели 1...4).

Отличительной особенностью летательных аппаратов, выполненных по технологии «Стелс» является малая средняя случайная составляющая сигнала, отраженного от объекта, и увеличенная дисперсия этого сигнала. Это означает, что диаграмма обратного рассеяния малозаметного объекта должна иметь лепестковую структуру. Желательно, чтобы «...максимумов, превышающих порог обнаружения, было как можно меньше, а их угловое положение выбиралось бы с учетом распределения углов наблюдения объекта в момент обнаружения» [2]. Реализация этих требований возможна при использовании целей с клиновидными элементами, отражающими при некоторых углах падения почти зеркально. Значение $K_{\text{ц}}$ таких целей значительно превышает соответствующую величину для релеевской цели и достигает $K_{\text{ц}} \leq 10$.

Вероятностную модель флуктуаций амплитуды эхо-сигналов на фоне шума для таких целей можно получить, воспользовавшись следующими соображениями.

Будем полагать, что цель (цели) с клиновидными отражающими элементами может длительное время наблюдаться в пределах ракурсных углов Θ_i , которым соответствует средняя эффективная отражающая поверхность $\sigma_{\text{ц}i}$. При этом условная плотность вероятности для отраженного эхо-сигнала, наблюдаемого на фоне шума, будет соответствовать модели 4 (табл. 1) при условии, что $q^2 = q_i^2 \sim \sigma_{\text{ц}i}$, т.е. $P_4(U) \rightarrow P_4(U/q_i^2)$.

Для других ракурсов Θ_j будут другие средние значения отношения сигнал/шум q_j^2 и $P_4(U) \rightarrow P_4(U/q_j^2)$.

Если известна плотность непрерывно распределенной интенсивности сигнала (отношения сигнал/шум) $(q_i^2 \rightarrow q^2)W(q^2)$, то по формуле полной вероятности можем найти безусловную плотность распределения амплитуд эхо-сигнала на фоне шума:

$$P(U) = \int_0^{\infty} P(U/q^2) \cdot W(q^2) dq^2. \quad (6)$$

Распределение $W(q^2)$ неизвестно, можно считать заданными только некоторые, доступные в экспериментальных исследованиях, статистические характеристики случайной величины q^2 : математическое ожидание $m = \langle q^2 \rangle$ и дисперсию $D = \langle (q^2 - m)^2 \rangle$ или относительную величину флуктуаций мощности $\Delta = \sqrt{D}/m$. В этом случае распределение вероятности q^2 получится не произвольным, а подчиненным следующим ограничениям:

$$\int_0^{\infty} W(q^2) dq^2 = 1; \quad \int_0^{\infty} q^2 \cdot W(q^2) dq^2 = m; \quad \int_0^{\infty} (q^2 - m)^2 \cdot W(q^2) dq^2 = D.$$

Предлагается в качестве плотности распределения $W(q^2)$ воспользоваться гамма-распределением, [3] обобщающим основные одномодальные законы распределения и позволяющим аппроксимировать с необходимой степенью точности те существующие законы распределения, которые нельзя получить в виде частных случаев из более простых (Хойта, Релея и т.д.) распределений. В этом случае выражение (6) имеет вид:

$$P(U, m, \Delta) = \int_0^{\infty} \frac{U}{q^2 + 1} \cdot \exp\left(-\frac{U^2}{2 \cdot (q^2 + 1)}\right) \cdot \frac{(q^2)^{\Delta^2 - 1}}{(m \cdot \Delta^2)^{\Delta^2} \cdot \Gamma(\Delta^2)} \cdot \exp\left(-\frac{q^2}{m \cdot \Delta^2}\right) dq^2. \quad (7)$$

Из многообразия моделей, получаемых с помощью выражения (7) для разных Δ , выделим две. Модель, описывающую плотность распределения огибающей аддитивной смеси шума и сигнала при параметре $1,44 \leq K_{\Pi} < 2,22$ ($0 \leq \Delta < 1,5$ дБ). В частном случае, при значении параметра $\Delta = -0,9$ дБ ($K_{\Pi} = 1,5$), выражение (7) можно записать в замкнутом виде (полагаем $\sigma_{\text{ш}}^2 = 0$) (распределение Пирсона, модель 5, табл. 1):

$$P_5(U, m) = m^{-1} \cdot U \cdot \exp\left(-\sqrt{m^{-1}} \cdot U\right).$$

Другая модель соответствует $2,22 \leq K_{\Pi} \leq 10$ ($1,5 \leq \Delta \leq 5$ дБ); част-

ный случай при $\Delta = 1,5$ дБ ($K_{\text{ц}} = 2,22$, $\sigma_{\text{ш}}^2 = 0$) дает экспоненциальное распределение $P_6(U, m) = m^{-1} \cdot \exp(-m^{-1} \cdot U)$.

Характеристики и примеры воздушных объектов, соответствующих введенным моделям ($P_5(U, m)$, $P_6(U, m)$), также представлены в табл. 1. Кривые 1 ... 6 плотностей распределения для введенных моделей представлены на рис. 1. Среднее значение отношения сигнал/шум для всех моделей (q^2 – модели 1 ... 4; m – модели 5, 6) на рис. 1 принято равным 20 дБ.

Все кривые унимодальны, с ростом номера модели мода и, как можно показать, медианное значение, смещаются в область малых значений аргумента. По мере увеличения номера модели уровень флуктуаций амплитуды эхо-сигнала относительно среднего значения монотонно возрастает. Отметим, что кривая для релеевского распределения ($P_4(U)$) занимает промежуточное положение среди других распределений.

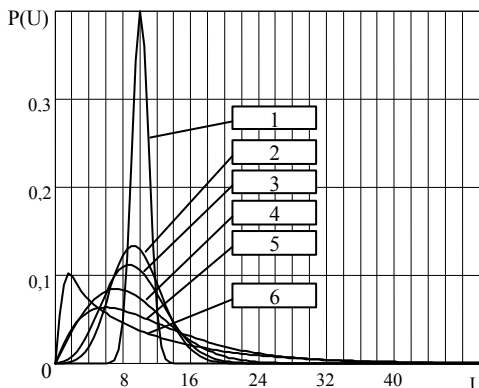


Рис. 1. Плотности распределения вероятности амплитуд эхо-сигналов целей, описываемых различными статистическими моделями

3. Насколько полно ряд из 6 моделей охватывает все возможные варианты описания? Вопрос полноты может касаться различных показателей качества радиолокационной информации: надежности обнаружения и сопровождения, точности измерения координат (параметров движения), качества классификации целей. Надежность обнаружения оценим, воспользовавшись условными вероятностями правильного обнаружения D и ложной тревоги F . На рис. 2 построено семейство кривых обнаружения для уровня ложной тревоги ($F = 10^{-6}$). Номер кривой соответствует номеру модели в табл. 1.

Выводы. Из рассмотрения следует, что предложенные распределения $P_5(U)$, $P_6(U)$ позволяют более широко охватить возможные условия обнаружения реальных целей.

Общие закономерности для всех кривых соблюдаются: при возрастании уровня относительных флуктуаций сигнала для достижения высоких значений D ($D \rightarrow 1$) необходимы дополнительные энергетические затраты (растет требуемое пороговое значение q^2); при малых значениях q^2 ($q^2 < 6 \dots 10$ дБ) сильно флуктуирующий сигнал наблюдается лучше.

Кривая релейского распределения ($P_4(U)$) дает промежуточные результаты, т.е. такой сигнал можно считать наиболее представительным.

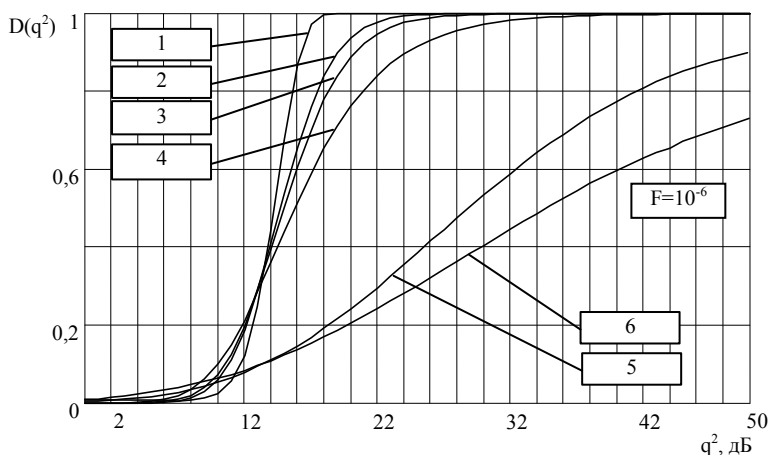


Рис. 2. Кривые обнаружения

Информационное расстояние $S(q^2)$ (уровень различимости, расстояние Бхаттачари) для любой пары сигналов можно определить с помощью

выражения: $S(q^2) = -\ln \left(\int_0^\infty \sqrt{P_i(U/q^2) \cdot P_j(U/q^2)} dU \right)$ [4]. Анализ показыва-

ет, что модельный ряд обеспечивает сравнительно равномерное заполнение шкалы информационных расстояний (с шагом 2...5 дБ), в центре которой находится релейский сигнал (при этом $q^2 = 20$ дБ, число импульсов в пачке $N = 20$).

ЛИТЕРАТУРА

1. Ширман Я.Д., Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. – М.: Радио и связь. – 1981. – 416 с.
2. Ананьин Э.В., Ваксман Р.Г., Патраков Ю.М. Методы снижения радиолокационной заметности // Зарубежная радиоэлектроника. – 1994. – № 4.
3. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения. – М.: Мир, 1984. – 738 с.
4. Расчет помехоустойчивости систем передачи дискретных сообщений: Справочник / Под ред. Л.М. Финка. – М.: Радио и связь, 1981. – 232 с.

Поступила 28.10.2005

Рецензент: доктор технических наук, профессор А.П. Кондратенко,
Харьковский университет Воздушных Сил